



## 저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

Low velocity impact properties  
of p-aramid composites  
impregnated with  
magnetorheological fluid

자기유변유체를 함침한 아라미드 복합재료의  
저속 충격 특성 평가

2013 년 2 월

서울대학교 대학원

재료공학부

정 희 윤

Low velocity impact properties of p-aramid  
composites impregnated with  
magnetorheological fluid

자기유변유체를 함침한 아라미드  
복합재료의 저속 충격 특성 평가

지도 교수 강태진

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2013 년 2 월

서울대학교 대학원  
재료공학부  
정 희 윤

정희윤의 공학석사 학위论문을 인준함  
2013 년 2월

위 원 장 \_\_\_\_\_ (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

# ABSTRACT

자기유변유체 (Magnetorheological Fluid, MRF)를 함유한 아라미드 직물을 고인성의 폴리우레탄 필름으로 코팅하여 우수한 내충격성을 가지는 지능형 에너지 흡수 소재를 제조하고 그 특성을 평가하였다.

연구에 사용한 자기유변유체는 미네랄 오일에 산화철 입자가 고르게 분산된 물질로서 외부 자기장 인가 시 순간적으로 전단응력과 점도가 증가하는 거동을 보인다.

자기유변유체를 아라미드 직물에 함침하여 구성사의 pull-out 시험을 수행한 결과 외부 자기장이 없더라도 이 물질이 직물내부의 공극을 점유하는 동시에 구성사 간의 마찰력으로 의해 pull-out 저항성이 증가하였으며, 외부 자기장 인가 시에는 pull-out 저항성이 더욱 증가함을 확인하였다.

자기유변유체가 함침된 아라미드 직물을 폴리우레탄 필름으로 코팅할 경우에는 아라미드 직물과 폴리우레탄 필름 사이의 접착에 의해서 pull-out 저항성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 자기유변유체가 함침된 경우에는 오일이 윤활유 역할을 하여 pull-out 저항성이 폴리우레탄 필름만 코팅한 직물보다 작게 나오는 것을 확인하였다.

굽힘 강성 특성을 살펴본 결과 자기유변유체가 포함되지 않은 샘플의 경우에는 항상 일정한 굽힘 강성을 보이나, 자기유변유체를

포함한 복합재료의 경우에는 외부 인가 자기장의 세기에 비례하여 강성이 증가함을 확인 할 수 있었다.

저속 충격 시험을 통하여 각 샘플의 충격흡수 에너지를 비교한 결과 동일한 면밀도 하에서 자기유변유체 또는 폴리우레탄 필름을 도입한 샘플이 보다 큰 에너지를 흡수하였으며 PU-MRF/aramid 시편의 경우 자기장 인가 시 neat aramid 보다 3배 많은 에너지를 흡수함을 확인할 수 있었다. 이는 neat aramid 같은 경우에는 primary yarn의 파단이 에너지 흡수의 주요 메커니즘이나 자기유변 유체 함침 및 폴리우레탄 필름 적층 시에는 직물 내에 존재하는 자장에 따른 강성 증가와 자성입자의 마찰력, PU film와 직물간의 delamination, debonding, matrix cracking 과 같은 효과가 복합적으로 작용하기 때문이다.

주요어: 자기유변유체(Magnetorheological Fluid), 폴리우레탄 필름, 아라미드 직물, 액체방호재료(soft body armor), 저속 충격

학번 : 2011-20671

# Contents

<b><i>ABSTRACT</i> .....</b>	<b><i>i</i></b>
<b><i>LIST OF FIGURES</i> .....</b>	<b><i>v</i></b>
<b><i>LIST OF TABLES</i> .....</b>	<b><i>vii</i></b>
<b><i>1. Introduction</i> .....</b>	<b><i>1</i></b>
<b><i>2. Literature Review</i> .....</b>	<b><i>4</i></b>
2.1 Magnetorheological Fluid (MRF) .....	4
2.2 Polyurethane (PU) .....	6
2.3 P–aramid fabrics .....	8
2.4 Low velocity impact property of aramid fabrics impregnated with MRF .....	10
<b><i>3. Experimental</i> .....</b>	<b><i>12</i></b>
3.1 Materials .....	12
3.1.1 Magnetorheological Fluid (MRF) .....	12
3.1.2 Polyurethane (PU) .....	13
3.1.3 P–aramid fabrics .....	14
3.2 Preparation of samples .....	15
3.3 Characterization .....	16
3.3.1 Morphology .....	16
3.3.2 Rheological Properties of MRF .....	16
3.3.3 Yarn pull–out test .....	17
3.3.4 Puncture resistance test .....	19
3.3.5 Flexural rigidity test .....	20
3.3.6 Low velocity impact test .....	21
<b><i>4. Results and discussion</i> .....</b>	<b><i>23</i></b>
4.1 Morphology .....	23

4.2	Rheological properties of MRF .....	24
4.3	Yarn Pull-out test .....	27
4.4	Puncture resistance test .....	31
4.5	Flexural rigidity test .....	34
4.6	Low velocity impact properties of PU/aramid composites impregnated with MRF .....	36
4.6.1	Effect of boundary condition .....	36
4.6.2	Effect of PU film thickness.....	40
4.6.3	Effect of fabrication system and magnetic field.....	45
5.	<i>Conclusion</i> .....	53
6.	<i>References</i> .....	55
	<i>ENGLISH ABSTRACT</i> .....	57

# LIST OF FIGURES

- Figure 2.1 Stress versus strain rate for a Bingham plastic
- Figure 2.2 Schematic diagram of MRF
- Figure 2.3 Chemical structure of Polyurethane
- Figure 2.4 Chemical structure of P-aramid fiber
- Figure 2.5 A schematic of the instantly fortifying mechanism of MRF on Kevlar fabric
- Figure 3.1 Stress versus strain curve of polyurethane
- Figure 3.2 Schematic diagram of experimental procedures
- Figure 3.3 Schematic drawing of a pullout specimen
- Figure 3.4 Pullout test (left) under magnetic field (right)
- Figure 3.5 Schematic diagram of a puncture resistance test
- Figure 3.6 Schematic drawing of a flexural rigidity
- Figure 3.7 Schematic drawing of a impact specimen
- Figure 3.8 Schematic diagram of low velocity impact test
- Figure 4.1 Morphology of aramid fabric impregnated with MRF
- Figure 4.2 Rheological behavior of MRF (a) Shear stress versus shear rate (b) Viscosity versus shear rate
- Figure 4.3 Load-Extension curves of (a) neat aramid, MRF/aramid (b) PU/aramid, PU-MRF/aramid
- Figure 4.4 Maximum pullout force of (a) neat aramid, MRF/aramid (b) PU/aramid, PU-MRF/aramid
- Figure 4.5 Load-extension curve of puncture resistance test (a) neat aramid, MRF/aramid (b) PU/aramid, PU-MRF/aramid
- Figure 4.6 Energy absorption of puncture resistance test
- Figure 4.7 Flexural rigidity under magnetic field
- Figure 4.8 Load-energy versus time curves of (a) non treated aramid (b)



aramid treated with epoxy

Figure 4.9 Low velocity impact test specimen of non treated aramid  
(left) aramid treated with epoxy (right)

Figure 4.10 Load-energy versus time curves of (a) film thickness 0.05  
mm (b) film thickness 0.1 mm

Figure 4.11 Specific absorbed energy of different film thickness

Figure 4.12 Low velocity impact test specimen of (a) film thickness  
0.05 mm (b) film thickness 0.1 mm

Figure 4.13 Load-energy versus time curves of (a) neat aramid (b)  
PU/aramid

Figure 4.14 Load-energy versus time curves of MRF/aramid (a) Field  
off (b) Field on

Figure 4.15 Load-energy versus time curves of PU-MRF/aramid (a)  
Field off (b) Field on

Figure 4.16 Specific absorbed energy of different fabrication system

Figure 4.17 Low velocity impact test specimen of (a) neat aramid (b)  
PU/aramid (c) MRF/aramid (d) PU-MRF/aramid

# LIST OF TABLES

Table 3.1 Specifications of magnetorheological fluid

Table 3.2 Specifications of p-aramid fabrics

Table 4.1 Results of low velocity impact test of different boundary condition

Table 4.2 Results of low velocity impact test of different film thickness

Table 4.3 Results of low velocity impact test of different fabrication system

# 1. Introduction

방호재료는 고강력, 고탄성, 고내열성, 저비중성 등의 우수한 물리적 특성이 요구되며 충격강도가 우수해야 한다. 일반적으로 섬유재료는 그 우수한 물성으로 인해 군사용으로도 광범위하게 사용되고 있는데 특히 우수한 내충격성을 이용하여 방탄복, 방검복과 같은 개인 방호재에서 경량 전투차량 및 장갑차, 헬기와 같은 방호구조재로도 많이 활용되고 있다.

현재 방호소재로서 많이 사용되는 섬유소재로는 폴리아미드 계열의 Kevlar®, Twaron® 등과 폴리에틸렌 계열의 Dyneema®, Spectra® 등이 있으며 이들은 고강력, 고탄성, 고내열(amide 계열), 저비중(ethylene 계열)의 특성을 지닌다. 폴리아미드 계열은 유연성이 우수하여 착용감이 좋은 장점이 있으며 폴리에틸렌 계열은 상대적으로 더 가볍고 방탄성능도 우수하나 가격이 비싸고 유연성이 떨어져 착용감이 떨어지는 단점이 있다.

이들 섬유소재를 이용한 방호복, 특히 방탄복의 원리는 높은 강도를 지닌 섬유를 촘촘하게 압축하고 그물 형태로 엮갈려 체직함으로서 재료의 인장강도를 향상시켜 총탄의 운동에너지를 흡수하는 것이다.

고강도 섬유와 고분자 수지를 토대로 하는 현재 방호복 시스템의 성능 향상을 위해서는 최소 20~30 겹의 적층 수의 증대가 요구되나 이는 방호복의 무게 증가와 이에 따른 착용자의 활동성 및 쾌적성 감소의 문제가 야기된다. 이에 따라 현재 가볍고

유연하면서도 방호성능이 우수한 지능형 방호소재에 대한 연구가 널리 진행되고 있다. [1]

이러한 새로운 개념의 방호재료로서 기존의 hard body armor 가 아닌 soft body armor 의 일종으로 이른바 액체방호재료(LBA, liquid body armor)에 대한 관심이 높아지고 있으며 이미 미국방성 및 국내 대학, 연구소에서 많은 연구가 진행되고 있다. LBA 중 대표적인 소재는 크게 세 가지로 구분할 수 있는데 전단농화 유체 (shear thickening fluid, STF), 자기유변 유체 (magnetorheological fluid, MRF), 전기유변 유체 (electrorheological fluid, ERF)가 그것이다. 이 물질들은 평상시 외부 자극이 없는 상태에서는 액체상으로 존재하여 유연성을 가지고 있으나, 전단력, 자기장, 전기장과 같은 외부에서 자극이 가해지면 강성이 순간적으로 변하여 견고해지는 특성을 가진다. 이 현상은 외력이 제거되면 원상태로 완전히 회복되는 가역적인 반응이다. 이러한 물질을 기존 방호재료인 섬유소재와의 복합화를 통하여 유연성과 경량성 및 방호성능도 향상시키려는 연구가 진행되고 있다.[2, 3]

개인용 방호재료에서 또 다른 주요 인자는 방호재료에 사용되는 고분자 수지이다. 현재 폴리아미드 계열 복합재료에서는 페놀계 수지가 널리 사용되고 있으며 폴리에틸렌 계열 복합재료에서는 비닐에스터 수지 등이 사용되고 있다. 하지만 이들 수지는 모두 열경화성 수지로 취성이 강하여 낮은 방호성능을 보여주고 있다. 때문에 방호재료의 강도 향상 및 수지의 강인화에 많은 연구가 진행 되고 있다.[4]

본 연구에서는 평상시에는 유동성의 액체상이나 외부 자기장 인가 시 강성이 순간적으로 변화하는 자기유변 유체(MRF)와 고인성의 폴리우레탄(polyurethane, PU)을 파라아라미드(p-aramid) 직물에 도입한 샘플을 제조하고 pull-out, 관통 저항성, 굽힘 강성 및 저속 충격 시험을 통해 우수한 내충격성을 갖는 지능형 에너지 흡수 방호재료를 구현하고자 하였다.

## 2. Literature Review

### 2.1 Magnetorheological Fluid(MRF)

자기유변유체(Magnetorheological fluid, MRF)란 자기장이 부여되면 유변 물성이 급격히 증가하고 자기장이 사라지면 이러한 유변 물성이 감소되어 본래의 유체와 같은 성질을 가지는 가역적으로 반응하는 유체를 말한다. 이러한 자기유변유체는 자기장 하에서 자기 편극화를 보이는 입자들로 이루어진 현탁액이며, 자기장 하에서 자화된 입자들 사이의 상호 작용력에 의해 사슬모양의 미세구조를 형성하고 수 밀리초의 빠른 응답과 높은 항복응력을 가진다.[5-7]

이와 같은 유체는 Figure 2.1에서 보는 바와 같이 Bingham 모델로 표시할 수 있다.[8, 9] 여기서  $\tau$ 는 전단응력,  $\eta$ 는 소성점도(plastic viscosity),  $\tau_y$ 는 자기력 세기에 비례하는 동적 항복 응력,  $\dot{\gamma}$ 는 전단속도를 나타낸다.

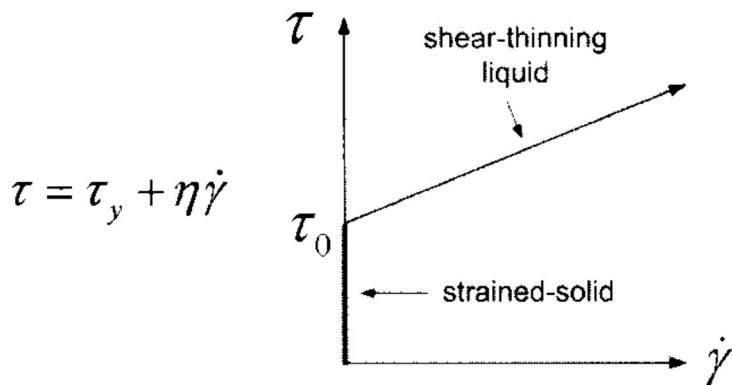


Figure 2.1 Stress versus strain rate for a Bingham plastic

자기유변 유체는 대부분 직경이 1~10  $\mu\text{m}$ 의 철(iron)입자나  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 의 마그네타이트(magnetite)로 구성되며, 흔히 자기력에 관계하는 마그네틱 물질이라고 하면 반자성체 (diamagnetic), 상자성체 (paramagnetic), 강자성체 (ferromagnetic), 페리자성체 (ferromagnetic), 반강자성체 (antiferromagnetic)의 5 가지 종류가 있다. 자기유변 유체에는 일반적으로 강자성체와 페리자성체가 사용된다.[9]

이런 유체는 응용장치에서 중요한 요소인 낮은 초기점도, 외부 자기장 하의 높은 전단 응력, 낮은 전력소모 등의 장점을 가지고 있기 때문에 자동차, 항공, 광학, 로봇 등 응용범위가 넓다.

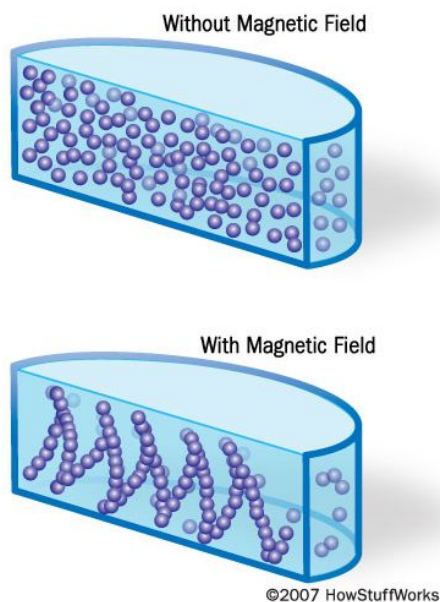


Figure 2.2 Schematic diagram of MRF

## 2.2 Polyurethane(PU)

폴리우레탄(polyurethane)은 주 사슬을 구성하는 중심부에 우레탄 결합- $\text{NH} \cdot \text{CO} \cdot \text{O}$ -를 가지는 중합체이다. 일반적으로 수산기를 함유하는 화합물과 이소시아네이트기(基)를 가지는 화합물과의 반응 등에서 얻고 있다. 섬유로서는 미국의 뒤퐁사에서 폴리우레탄 탄성섬유인 스팅텍스(Spandex®)가 개발되어 오늘날까지 공업적으로 생산되고 있다.

폴리우레탄은 2 차 전이온도가 실온 이하인 굴곡성이 풍부한 소프트 세그먼트(soft segment)와 강한 분자간력에 의해 결정구조를 갖는 하드 세그먼트(hard segment)로 이루어진 블록 공중합체이다. 섬유를 신장하였을 때 소프트 세그먼트는 길게 늘어나며 하드 세그먼트는 가교결합의 역할을 하여 분자사슬간의 미끄러짐을 억제한다. 신장력을 제거하면 소프트 세그먼트는 엔트로피가 증가하는 방향인 원래의 길이로 되돌아오며, 이러한 엔트로피 효과에 의해 고무와 같은 탄성이 나타나게 된다.

폴리우레탄은 신도가 500~700 %이고, 탄성회복률이 우수하기 때문에 합성 섬유, 우레탄 고무, 우레탄 도료, 인조 피혁, 접착제, 건재(建材) 등 기타 다양한 용도를 가지고 있으며, 에너지 흡수 소재로의 응용이 가능할 것으로 예상된다.[10, 11]



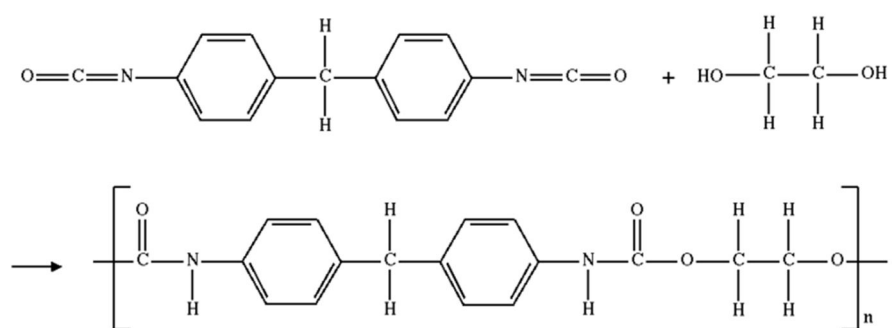


Figure 2.2 Chemical structure of Polyurethane

## 2.3 P-aramid fabrics

일반적으로 섬유재료는 그 우수한 물성으로 인해 군사용으로도 광범위하게 사용되고 있는데 특히 우수한 내충격성을 이용하여 방탄재료로 사용되고 있다. 현재 방호소재로서 많이 사용되는 섬유소재로는 폴리아미드 계열의 Kevlar®, Twaron® 등과 폴리에틸렌 계열의 Dyneema®, Spectra® 등이 있으며 이들은 고강력, 고탄성, 고내열(amide 계열), 저비중(ethylene 계열)의 특성을 지닌다. 폴리에틸렌 계열은 상대적으로 가볍고 방탄성능도 우수하나 가격이 비싸고 유연성이 떨어져 착용감이 떨어지는 단점이 있다.

위와 같은 고강도 섬유 중에서도 강도 높고 유연하며 가격이 비교적 저렴한 폴리아미드 계열이 현재 방호복에 널리 응용되고 있다. 폴리아미드 계열 중에서도 방향족 폴리아미드(aromatic polyamide)계열이 고강도 섬유 군에 속한다. 방향족 폴리아미드란 방향족 고리들이 아미드 결합( $-\text{CONH}-$ )에 의해 연결된, 즉 두 개의 방향족 고리 사이에 직접 붙은 아미드 결합이 85 % 이상인 합성고분자를 말한다. 방향족 폴리아미드는 지난 수십 년 동안 내열성 또는 고강도 섬유로서 많이 연구되어 왔으며, 그 섬유는 지방족 폴리아미드 섬유인 나일론과 구별하여 아라미드(aramid) 섬유로 알려져 있다. 아라미드 섬유는 인장강도 20 g/d 이상, 인장탄성률 500~1300 g/d 정도의 고강력을 갖고 있을 뿐 아니라, 분해온도 400 °C 이상의 고내열성과 -160 °C 에서도 섬유의 특성을 유지하는 우수한 내한성 및 절연성 그리고 내약품성을

나타내는 침단의 소재이다. 아라미드 섬유는 그 분자구조에 따라서 유연한 굴곡성의 분자사슬을 갖는 메타형과 강직한 막대상 분자사슬을 갖는 파라형으로 대별되며, 파라형 아라미드 섬유는 내열성 및 난연성을 가질 뿐 아니라 메타형에서는 찾아볼 수 없는 고강도 섬유로 제조될 수 있는 특성을 갖는다. 파라형 아라미드 섬유의 분자구조의 예는 Figure 2.4 과 같다.[12]

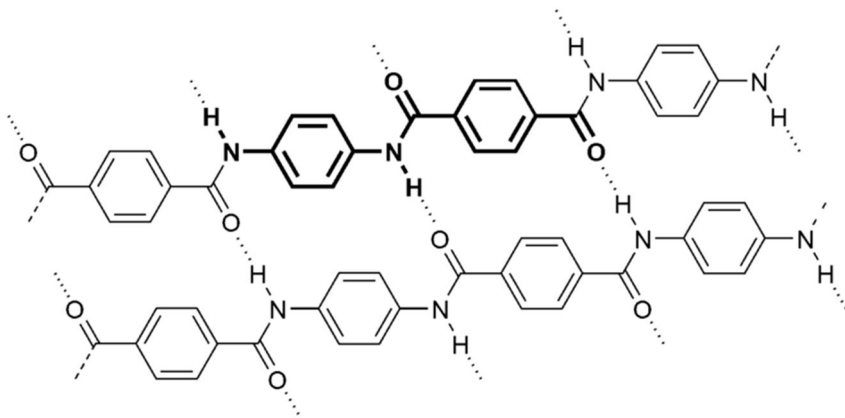


Figure 2.3 Chemical structure of P-aramid fiber

## 2.4 Low velocity impact property of aramid fabrics impregnated with MRF

현재 새로운 개념의 방호재료로서 기존의 hard body armor가 아닌 soft body armor의 일종으로 이른바 액체방호재료(LBA, liquid body armor)에 대한 관심이 높아지고 있으며 이미 미국방성 및 국내 대학, 연구소에서 많은 연구가 진행되고 있다.

Kang, T. J., et al. (2011)은 자기유변 유체의 유변학적 특성과 자기유변 유체를 함침한 아라미드 직물의 저속 충격 특성에 대하여 보고하였다.[13]

그들은 자기장 하에서 자성입자의 배향에 따라 점도가 증가하는 자기유변 유체의 성질을 직물에 응용하여, 자기장을 걸어 주었을 때 Stiffness가 증가하는 직물을 제조하고 특성을 평가하였다. 자기장 인가 시 직물내의 유체의 거동에 대하여 다음 Figure 2.5와 같이 나타내었다.

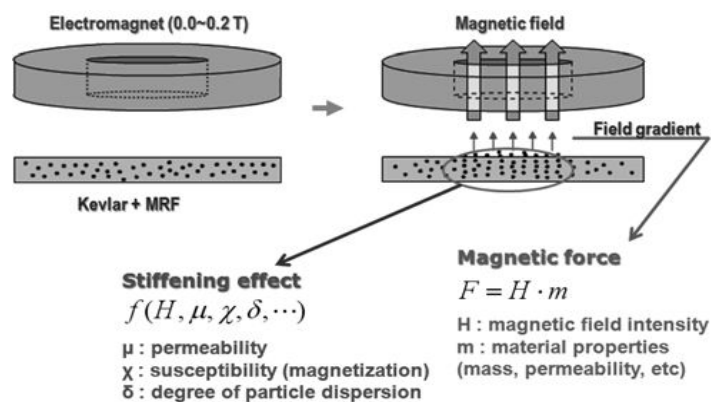


Figure 2.4 A schematic of the instantly fortifying mechanism of MRF on Kevlar fabric

Figure 2.5와 같이 stiffening effect으로 인하여 자기장을 가해주었을 때 직물내의 자성입자들이 마찰력이 증가하면서 저속 충격 시험 시 에너지 흡수 및 로드 값이 증가함을 보여주었으며, 평소에는 flexible한 직물이 자기장을 가해주었을 때 선택적으로 강성이 높아져 활동성 및 방호성능이 좋은 액체방호재료를 개발하였다.

## 3. Experimental

### 3.1 Materials

#### 3.1.1 Magnetorheological Fluid(MRF)

본 실험에는 자기유변 유체(MRF)로서 Ferrotec사의 Ferrofluid(EFH-1, oil based) 제품을 사용하였다. 자기유변 유체의 포화자화(Saturation magnetization)는 레오미터(MCR 301)로 측정한 결과로 330 mT이며 magnetite의 비율이 7.9 vol%로 구성되어 있다. 자세한 물성은 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Specifications of magnetorheological fluid

Property	Ferrofluid(EFH-1)
Appearance	Black-brown fluid
Carrier liquid	Light mineral oil
Viscosity (mPa · s)	6
Particle diameter (nm)	10
Density (g/ml)	1.21
Magnetic particle concentration (vol %)	7.9

### 3.1.2 Polyurethane(PU)

복합재료에 적층한 고분자 필름으로 일본의 DiaPLEX 사의 폴리우레탄을 사용하였다. 유리전이온도(Glass transition temperature,  $T_g$ )는 45 °C 이고, Figure 3.1 를 통하여 변형률이 400 % 이상인 고인성 고분자임을 확인 할 수 있다.

폴리우레탄은 별도의 공정 없이 사용하였으며 유기용매로는 Tetrahydrofuran(THF, Samchun chemical)을 사용하였으며 15 wt% 솔루션을 제조하여 사용하였다.

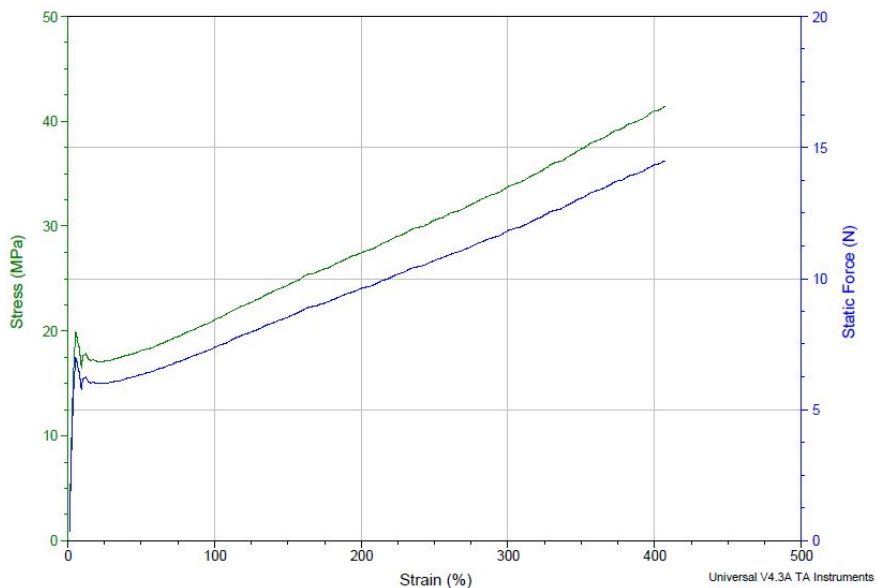


Figure 3.1 Stress versus strain curve of polyurethane

### 3.1.3 P-aramid fabrics

이 실험에서 사용한 고강력의 파라 아라미드(P-aramid) 직물은 Heracron(600 denier, Kolon)이다. 직물의 면밀도는 195.6 g/m<sup>2</sup> 이고, 10 cm×10 cm 당 yarn 의 수는 137×137(경사-위사)이다. 그리고 세부사항은 아래의 Table 3.2 에서 나타내었다.

Table 3.2 Specifications of p-aramid fabrics

Property	P-aramid fabrics
Yarn count(denier)	600
Fabric count(yarns/cm, warp×weft)	13.7×13.7
Areal density(g/m <sup>2</sup> , dry)	195.6
Thickness(mm)	0.29
Yarn tenacity(g/de)	27.1
Yarn elongation(%)	3.6
Young' s modulus(g/de)	303
Fabric system	Plain weave



### 3.2 Preparation of samples

MRF 를 함침한 폴리우레탄 아라미드 복합재료의 제조방법은 패딩-압축-적층-압축 크게 네 가지 과정으로 이루어진다. Figure 3.2 는 PU-MRF/aramid 복합재료를 제조하는 과정을 간략하게 나타낸 것이다.

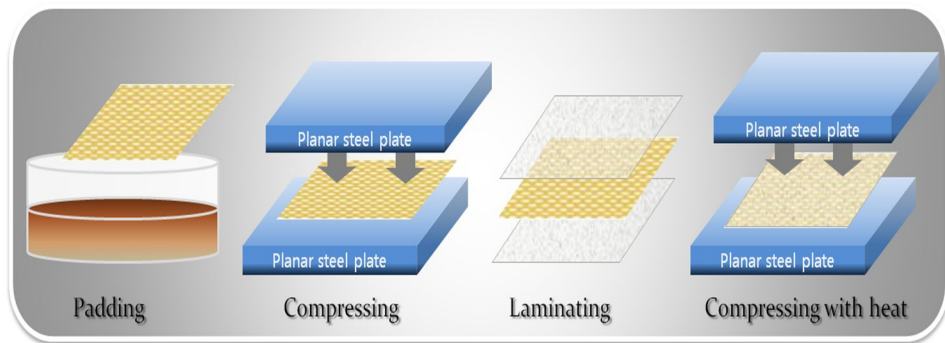


Figure 3.2 Schematic diagram of experimental procedures

아라미드 직물을 MRF 용액에 침지 후 프레스 장비를 사용하여  $10 \text{ kg/m}^2$  의 압력으로 1 분간 압축을 시켜주었다. 그 후 폴리우레탄 필름(두께: 0.1 mm, 0.05 mm)을 적층하여  $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$  에서 10 분간 동일한 압력하에서 압축 과정을 거친 후 상온에서 경화시켜 제조하였다.

## 3.3 Characterization

### 3.3.1 Morphology

자기유변유체가 함침된 직물의 표면 morphology 를 관찰하기 위하여 field emission scanning electron microscope (FE-SEM, JEOL, JSM-6300F, Japan) 을 사용하였다.

### 3.3.2 Rheological Properties of MRF

자기유변유체의 유변학적 특성을 알아보기 위하여 parallel-plate strain controlled rheometer (MCR 301, Anton Paar Companies, Germany) 장비를 사용하였다. Shear flow direction 에 수직인 방향으로 자기장을 걸어주기 위해, 자기장을 발생시키는 electromagnet kit 을 레오미터에 부착하여 사용하였고, 자기장은 0 mT 에서 440 mT 까지 인가하며 측정하였다.

### 3.3.3 Yarn pull-out test

외부의 충격을 받았을 때 직물 내에 함침된 MRF가 경-위사 내의 미세한 간격 내에 존재하면서 자기장의 유무에 따라 영향을 줄 것으로 유추가 가능하다. 또한 직물에 코팅된 폴리우레탄이 경-위사 간에 슬립이 일어나는데 있어서 영향을 줄 것으로 예측된다.

따라서 직물이 충격을 받는데 있어서 MRF 및 폴리우레탄이 직물내의 경-위사에 미치는 영향을 알아보기 위하여 폴아웃 테스트를 수행하였다.

시험편의 형태는 폴아웃 길이가 100 mm가 되도록 폴아웃이 일어나는 실을 포함하여 미리 5 mm 정도 횡방향으로 잘라주어 실이 한 가닥이 뽑힐 수 있도록 하고 상부의 가장자리는 접어서 고정한다. 자세한 시험편의 형태는 Figure 3.3에 나타내었다.

측정장비는 Instron® 5543를 사용하였고, 50 mm/min의 속도로 측정하였다.

또한, 자기장의 인가에 따른 MRF의 영향을 알아보기 위하여 실험 시 300 mT의 자기장을 가지는 전자석을 사용하여 측정하였다. 아래 Figure 3.4를 통하여 구체적인 측정방법을 확인할 수 있다.

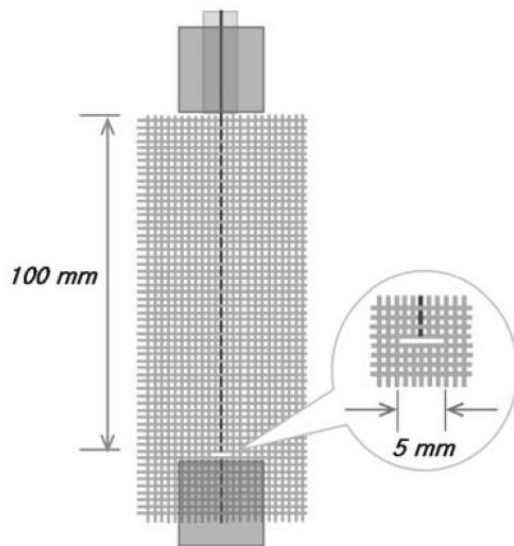


Figure 3.3 Schematic drawing of a pullout specimen

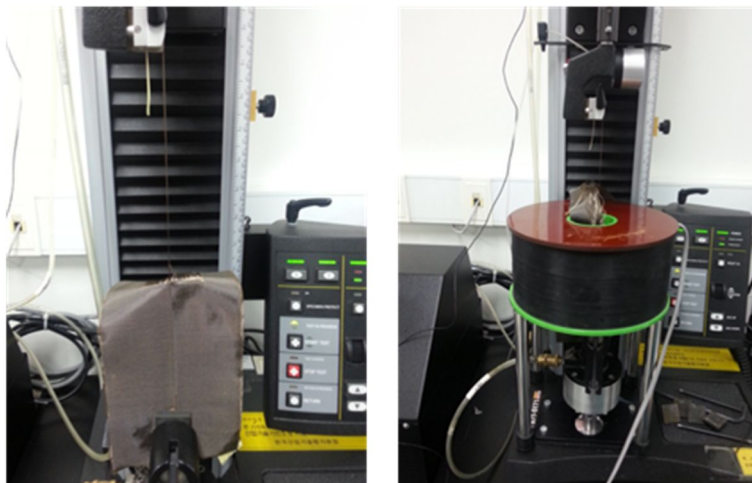


Figure 3.4 Pullout test (left) under magnetic field (right)

### 3.3.4 Puncture resistance test

개인용 방호재료로서의 적합성을 평가하기 위하여 관통 저항성 시험을 수행하였다. ASTM F 1342-05 “Standard test method for protective clothing material resistance to puncture” 규격에 맞추어 실험을 수행하였고 NIJ.0115.00 standard 규격에 맞추어 S1 blade 를 제조하여 실험을 수행하였다.

시편의 규격은 150 mm×150 mm 로 제작하였고 5 mm/min 의 속도로 관통 시 20 mm 가 관통되었을 때의 흡수 에너지를 계산하여 관통 저항성을 알아보았다.

측정장비는 Instron® 4467 을 사용하여 측정하였고 자기장에 따른 영향을 알아보기 위하여 100 mT 의 자기장을 가지는 전자석을 사용하였다. 아래 Figure 3.5 를 통하여 측정방법을 확인할 수 있다.

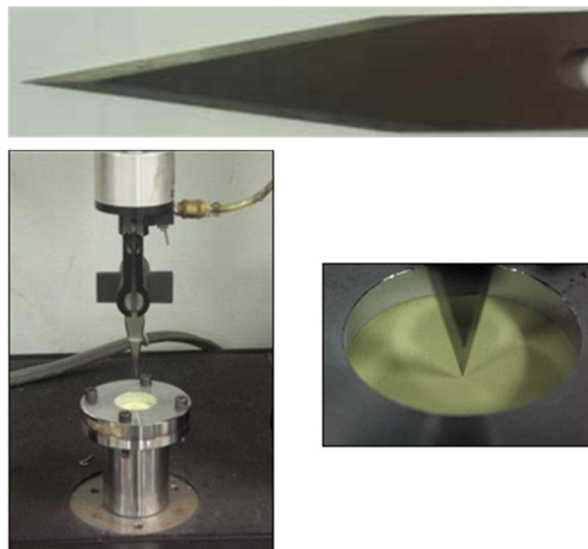


Figure 3.5 Schematic diagram of a puncture resistance test

### 3.3.5 Flexural rigidity test

자기장 인가의 따른 직물의 stiffness 증가를 확인하기 위하여 Flexural rigidity test 를 수행하였다. ASTM D1388 “Standard test method for stiffness of fabrics” 규격에 따라서 실험을 수행하였으며 Cantilever bending test 법으로 실험하였다.

시편의 규격은 25 mm×200mm 로 제작하였고 자기장은 0~100 mT 로 다양하게 인가하였다. 직물이 이루는 각이  $41.5 \pm 5^\circ$  를 이룰 때 직물의 길이를 측정하여 다음 식을 통하여 flexural rigidity 를 계산하였다.

$$G = 1.421 \times W \times C^3 \times 10^{-5}$$

G 는 flexural rigidity(mN·cm), W 는 weight per unit area (g/m<sup>2</sup>), c 는 bending length (cm)를 나타낸다.

구체적인 모식도는 Figure 3.6 에 나타내었다.

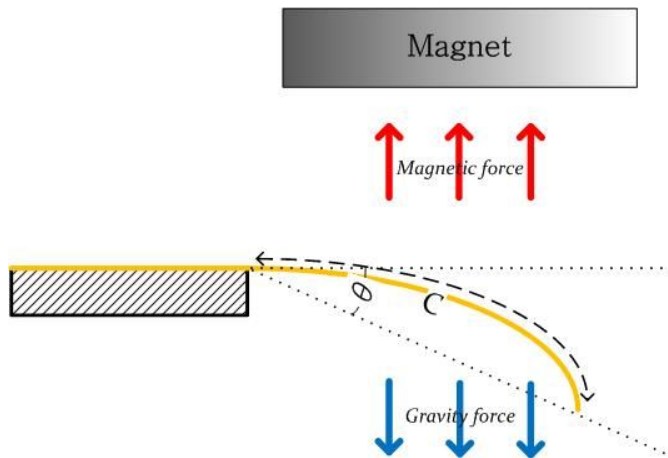


Figure 3.6 Schematic drawing of a flexural rigidity

### 3.3.6 Low velocity impact test

개인용 방호소재에 있어서 가장 중요한 부분이 충격 에너지 흡수이다. 따라서 외부 충격에 따른 에너지 흡수 거동을 확인하기 위하여 저속 충격시험을 수행하였다. ASTM D3763 “Standard test method for high speed puncture properties of plastics using load and displacement sensors” 규격에 맞추어 실험을 수행하였다.

시편의 규격은 Figure 3.7 과 같이 300 mm×300 mm 의 십자 모양의 시편을 준비하였다. 시편의 중심에 충격이 가해지는 100 mm×100 mm 이외의 부분은 그림과 같이 에폭시를 코팅 하여 직물의 슬립을 방지하였다.

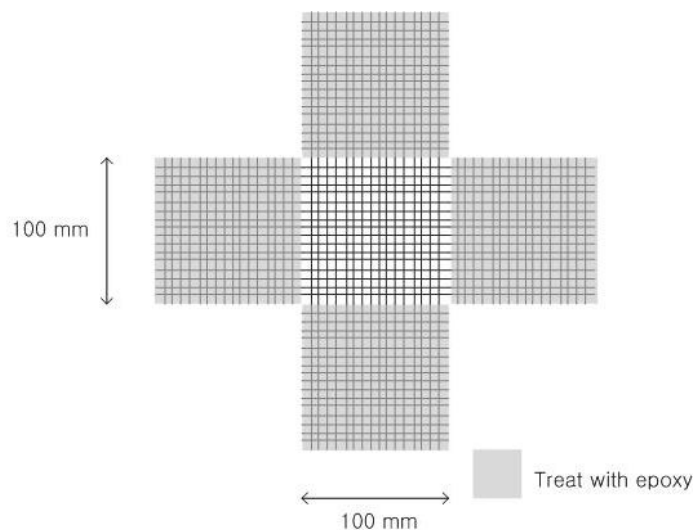


Figure 3.7 Schematic drawing of a impact specimen

측정장비는 Instron® dynatup 9250V impact tester 장비를 사용하였고 1/4 inch hemisphere 형태의 Tub 을 사용하였다. Impact energy 는 30 J 로 동일하게 측정하였고 impact velocity 는 3 m/s, drop weight 은 6.4296 kg 로 설정하여 측정하였다.

자기장의 영향을 확인하기 위하여 100 mT 의 전자석을 직물의 그립부분에 설치하여 측정하였다. Figure 3.8 을 통하여 측정방법을 확인 할 수 있다.

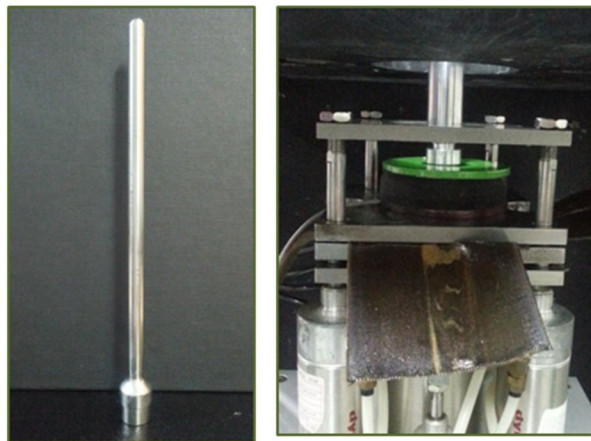


Figure 3.8 Schematic diagram of low velocity impact test



## 4. Results and discussion

### 4.1 Morphology

MRF 가 함침된 직물의 SEM image 를 Figure 4.1 에 나타내었다. 직물 내에 40~50 nm 의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  입자가 응집 없이 균일하게 분산되어 있는 것을 확인 할 수 있었다.

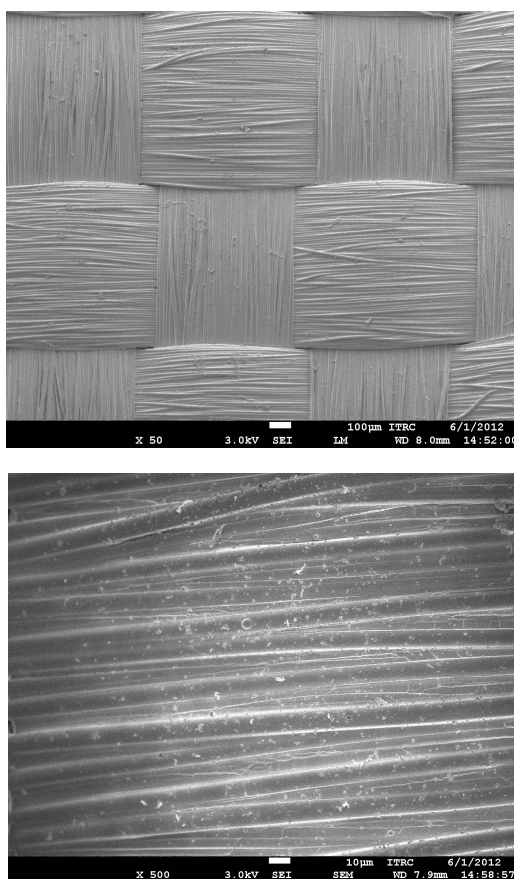


Figure 4.1 Morphology of aramid fabric impregnated with MRF

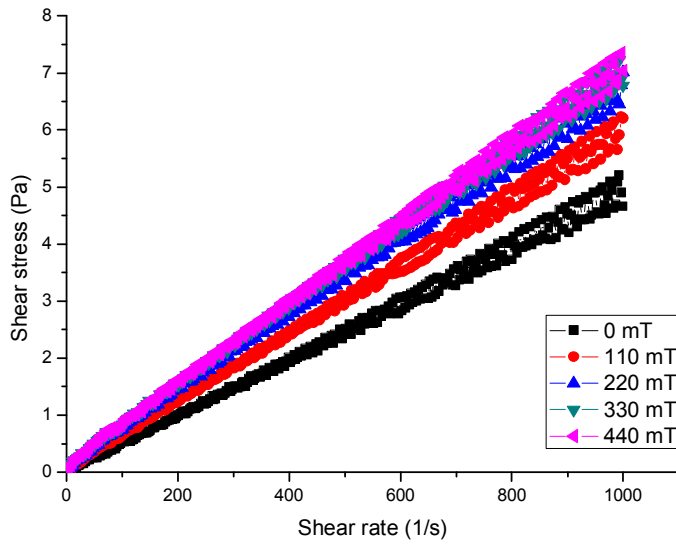
## 4.2 Rheological properties of MRF

MRF 의 자기장 인가에 따른 유변학적 특성을 분석하기 위하여 0 mT ~ 440 mT 까지 다양하게 자기장을 인가해주면서 Shear rate 에 따른 shear stress 와 viscosity 값을 측정하였다.

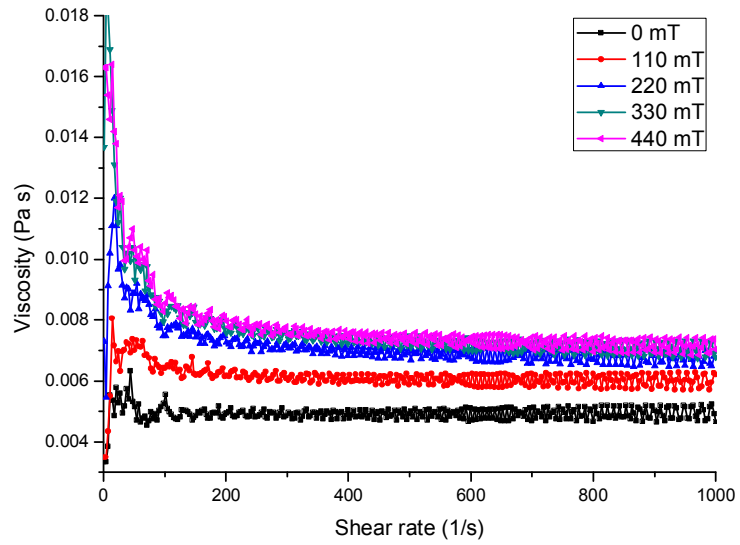
Figure 4.2 (a)는 shear rate 에 따른 shear stress 의 영향을 나타내는 그래프이다. 그래프에서 확인 할 수 있듯이 shear rate 가 증가할수록 용액 내에 존재하는 자성입자의 영향으로 shear stress 가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 자기장이 증가할수록 용액 내에 자성입자가 더 강하게 체인을 형성하기 때문에 일정한 shear rate 일 때 shear stress 값이 상대적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

Figure 4.2 (b)는 shear rate 에 따른 viscosity 의 영향을 나타낸 그래프이다. 0 mT~440 mT 까지 자기장을 인가 시 자기장이 증가할수록 MRF 의 viscosity 도 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 자기장이 비인가 시 MRF 는 newtonian fluid 거동을 보이나 330 mT 이상의 자기장을 인가 시 MRF 는 shear thinning 거동을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 다음과 같은 거동을 나타내는 이유는 자기장이 낮을 때에는 자성입자가 체인을 형성하더라도 잘 깨지고 약하게 형성되기 때문에 shear rate 에 따른 점도의 변화가 크지 않지만 높은 자기장 하에서 용액 내의 자성입자가 자기장의 방향에 따라 배열하여 체인을 강하게 형성하면서 낮은 shear rate 일 때 높은 점도를 가지다가 shear rate 가 증가할수록 점도가 급감하는 현상을 나타내기 때문이다.

Figure 4.2 에서 확인 할 수 있듯이 자기장을 증가할수록 MRF 내의 자성입자의 자화가 함께 증가하다가 330 mT 이상에서는 자기장을 더 세게 증가해줘도 shear stress 와 viscosity 값이 크게 다르지 않음을 확인 할 수 있다. 이를 통해 MRF 의 포화 자화는 330 mT 에서 일어남을 확인 할 수 있었다.



(a)



(b)

Figure 4.2 Rheological behavior of MRF (a) Shear stress versus shear rate (b) Viscosity versus shear rate

### 4.3 Yarn Pull-out test

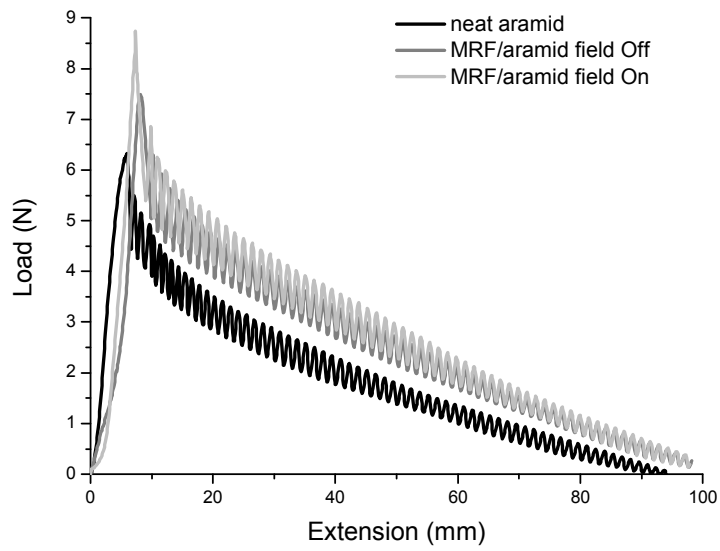
직물에 함침 된 MRF 와 적층 된 PU film 이 충격 시 직물에 미치는 특성을 확인 하기 위하여 풀아웃 테스트를 수행하였다.

Figure 4.3 (a) 는 neat aramid 와 MRF/aramid 의 load-extension 커브이고 Figure 4.4 (a) 는 각 샘플의 maximum pullout force 를 나타낸 그래프이다. 각 Figure 를 통하여 확인 할 수 있듯이 neat aramid 와 비교하여 MRF/aramid 는 직물내에 존재하는 자성입자의 마찰력으로 인하여 풀아웃 포스가 약간 증가함을 확인 할 수 있었지만 MRF 용액의 주 성분이 oil 성분이므로 섬유간의 슬립이 일어나서 neat aramid 와 크게 차이는 나타나지 않음을 확인 할 수 있었다. 자기장을 인가 시에도 자성입자의 배향에 따라서 풀아웃 포스가 약간 증가하였으나 크게 차이는 나타나지 않음을 확인 할 수 있었다.

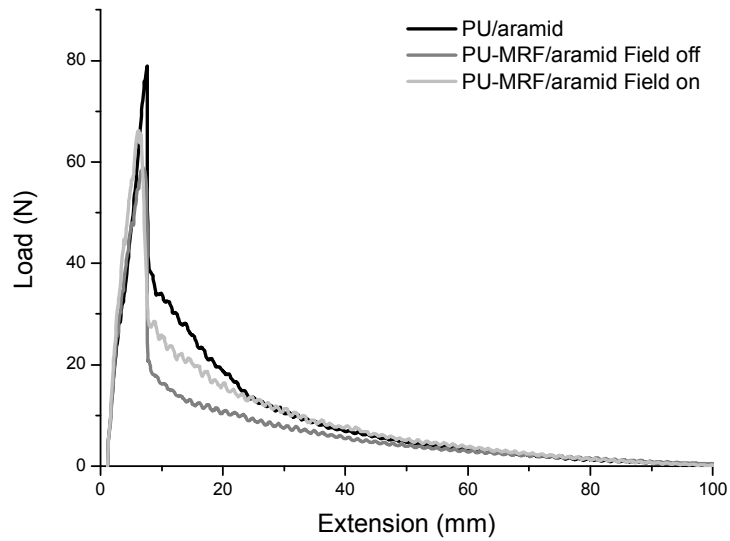
Figure 4.3 (b) 는 PU/aramid, PU-MRF/aramid 의 load-extension 커브이고, Figure 4.4 (b) 는 각 샘플의 maximum pullout force 를 나타낸 그래프이다. Figure 4.3 (a)와 비교하였을 때 시편에 PU film 이 적층 되었을 때 상대적으로 크게 풀아웃 포스가 증가함을 확인 할 수 있다. 그 이유는 섬유 한가닥이 풀아웃 될 때 직물에 적층 된 PU film 과 박리(delamination)가 일어난 후에 풀아웃 거동이 진행이 되기 때문에 필름과 직물의 interaction 으로 인하여 풀아웃 포스가 크게 증가하게 됨을 확인 할 수 있다. Figure 4.4 (b)에서 확인 할 수 있듯이, PU/aramid 시편이 가장 풀아웃 포스가 큰 값을 가지는 것을 확인 할 수

있는데 그 이유는 PU film 과 직물과의 interaction 이 강해서 섬유 한 가닥이 필름에서 박리되는데 더 큰 힘을 필요로 하기 때문이다.

그러나 PU-MRF/aramid 시편의 경우 필름과 직물 사이에 존재하는 MRF 의 영향으로 인하여 필름과 직물간의 interaction 이 감소하여 더 적은 풀아웃 포스를 나타냄을 확인 할 수 있었다. 또한 자기장을 인가하였을 때 직물내의 MRF 에 의한 자성입자의 마찰력으로 인하여 풀아웃 포스가 증가함을 확인 할 수 있었다.

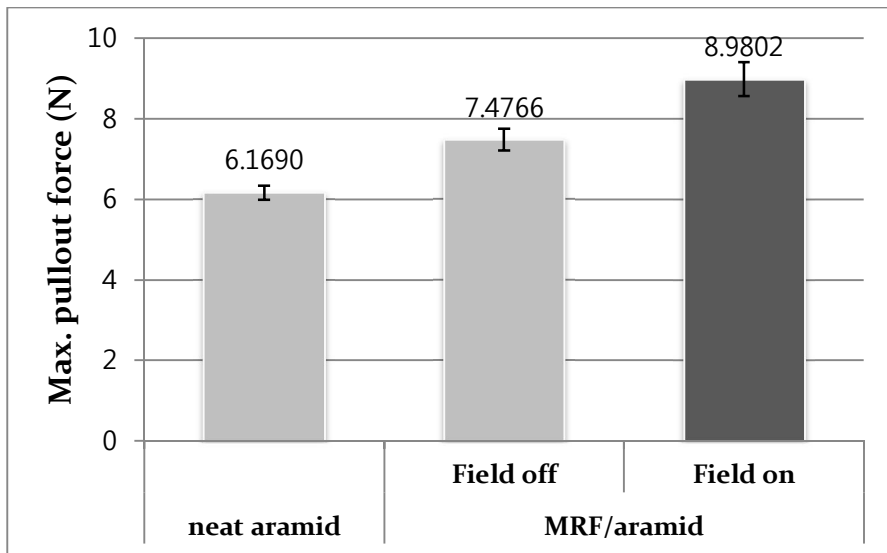


(a)

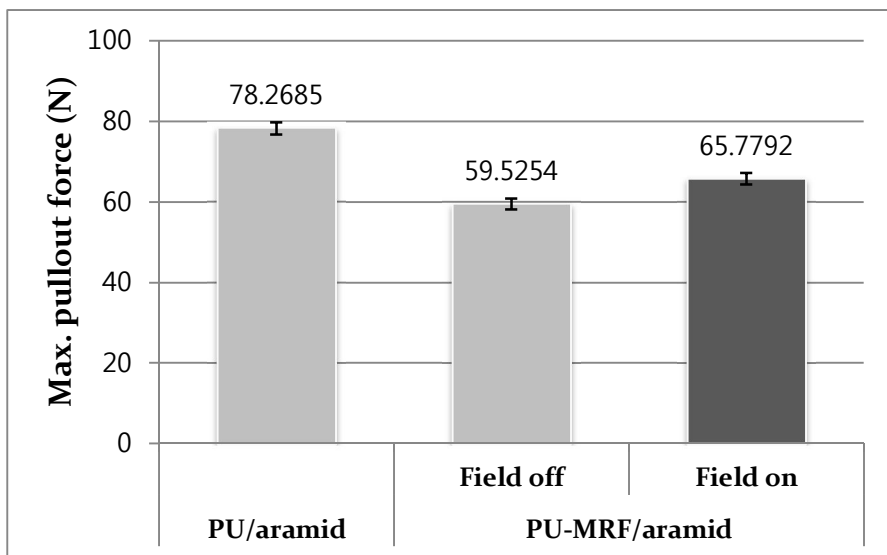


(b)

Figure 4.3 Load-Extension curves of  
(a) neat aramid, MRF/aramid (b) PU/aramid, PU-MRF/aramid



(a)



(b)

Figure 4.4 Maximum pullout force of  
 (a) neat aramid, MRF/aramid (b) PU/aramid, PU-MRF/aramid

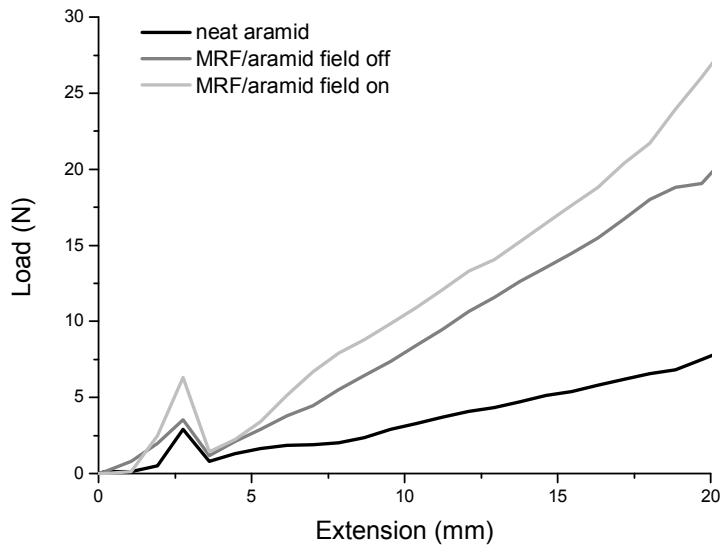


## 4.4 Puncture resistance test

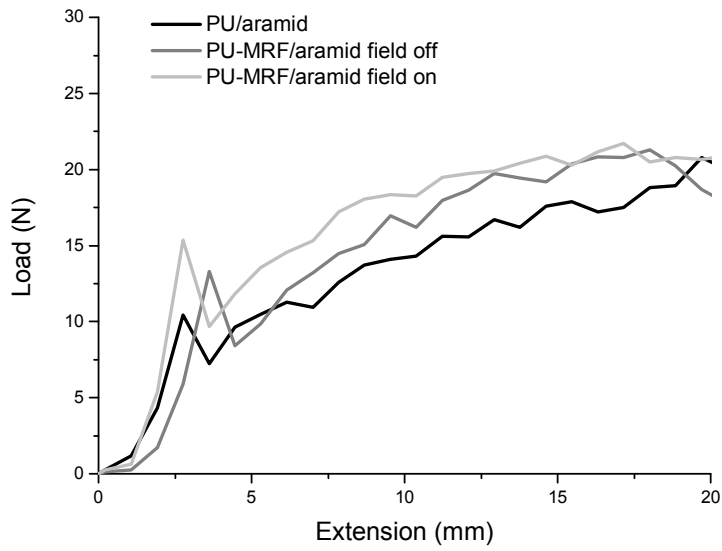
자기장 인가에 따른 직물의 방검 특성을 알아보기 위하여 puncture resistance test 를 수행하였다. Figure 4.5 (a)는 neat aramid 와 MRF/aramid 의 load-extension 커브이고 (b)는 PU/aramid 와 PU-MRF/aramid 의 load-extension 커브이다. Figure (a) 에서 확인 할 수 있듯이 MRF/aramid 직물 내부의 공극에 충전된 자기유변유체의 영향으로 자기장 인가 시 산화철 입자들의 배열로 인하여 neat aramid 와 비교하였을 때 초기 파단이 일어나는데 더 높은 힘을 필요로 하는 것을 확인 할 수 있었다.

폴리우레탄 필름을 코팅하였을 때 MRF 만 함유한 직물보다 더 높은 로드 값을 가지는 것을 Figure 4.5 (b)를 통하여 확인 할 수 있었다. 그 이유는 고인성의 폴리우레탄의 영향으로 섬유의 파단뿐만 아니라 폴리우레탄 matrix cracking 으로 인해 더 많은 에너지를 흡수하기 때문이다. PU film 만 코팅하였을 때 보다 MRF 를 첨가 시 우레탄의 영향뿐만 아니라 산화철 입자와 섬유간의 마찰력으로 인하여 더 높은 로드값을 가지며 자기장을 인가 시 그 정도가 더 높아지는 것을 확인 할 수 있었다.

Figure 4.6 은 20 mm 파단 시 흡수하는 에너지를 그래프로 나타내었다. PU-MRF/aramid 시편이 자기장을 인가 시 가장 높은 에너지 흡수를 나타내었다.



(a)



(b)

Figure 4.5 Load–extension curve of puncture resistance test  
(a) neat aramid, MRF/aramid (b) PU/aramid, PU–MRF/aramid

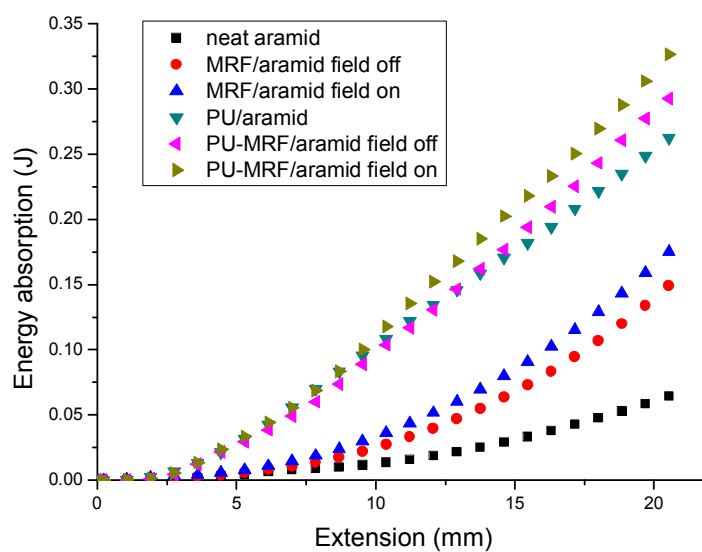


Figure 4.6 Energy absorption of puncture resistance test

## 4.5 Flexural rigidity test

자기장 인가에 따른 직물의 stiffness 를 측정하기 위하여 flexural rigidity test 를 수행하였다. Figure 4.7 에서 확인 할 수 있듯이, 자기장이 없을 때에는 neat aramid 가 가장 낮고 MRF/aramid, PU/aramid, PU-MRF/aramid 순으로 flexural rigidity 가 증가 하였다. 자기장이 없을 때에는 PU film 의 영향으로 PU film 이 존재 시 필름과 직물의 interaction 으로 stiffness 가 더 크게 나타났다.

그러나 자기장을 인가 시 neat aramid 와 PU/aramid 는 rigidity 의 변화가 없었지만 MRF/aramid 와 PU-MRF/aramid 는 크게 증가하는 것을 확인하였다. 그 이유는 자기장 하에서 직물 내에 존재하는 자성입자가 자기장을 따라 배향하게 되어 stiffness 가 증가 하기 때문이다. 75 mT 에서는 MRF/aramid, PU-MRF/aramid 모두 neat aramid 보다 대략 4 배정도 rigidity 가 증가하였고, 자기장에 따라 rigidity 가 증가하는 비율은 MRF/aramid 가 더 큼을 확인 할 수 있었다.

또한, 본 실험을 통하여 자기장의 세기에 따라 직물의 stiffness 를 조절 할 수 있음을 확인하였다..

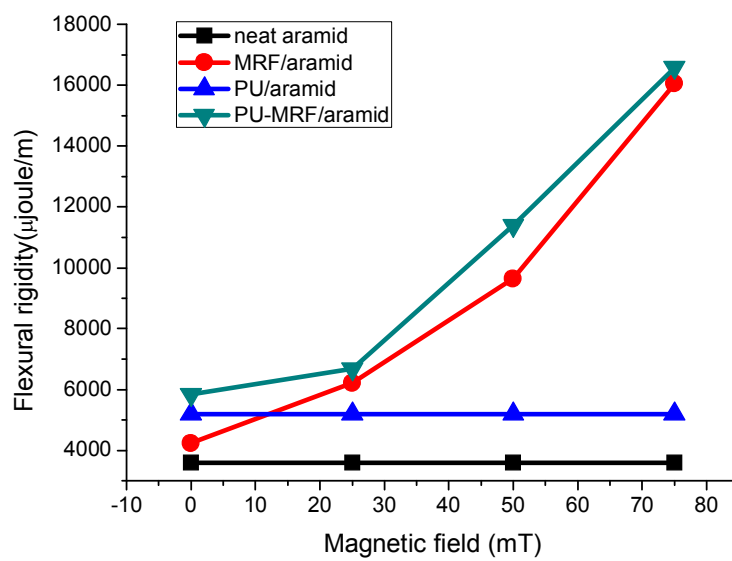


Figure 4.7 Flexural rigidity under magnetic field

## 4.6 Low velocity impact properties of PU/aramid composites impregnated with MRF

### 4.6.1 Effect of boundary condition

직물에 충격 시 PU film 과 MRF 의 영향을 알아보기 위하여 저속 충격시험을 수행하였다. 본 실험에 앞서 예비실험으로 충격 시험을 수행 시 boundary condition 에 의한 영향을 살펴보았다.

충격 시험을 수행할 때 중요하게 고려해야 할 요인이 시편의 슬립이다. 충격 시험은 재료가 파단이 일어 날 때의 흡수 하는 에너지를 계산 하여 특성을 평가 하게 되는데, 다른 복합재료나 금속에 비하여 직물 형태는 유연성이 좋기 때문에 충격을 가했을 때 그립 밑 부분으로 같이 밀려서 빠지거나 섬유 가닥이 파단이 되지 못한 채 그대로 밀려서 측정이 정확히 되지 않는 경우가 있다. 따라서 본 실험에서는 직물의 슬립을 최소화 해주기 위하여 직물의 사방에 에폭시를 처리하여 슬립을 방지하였다.

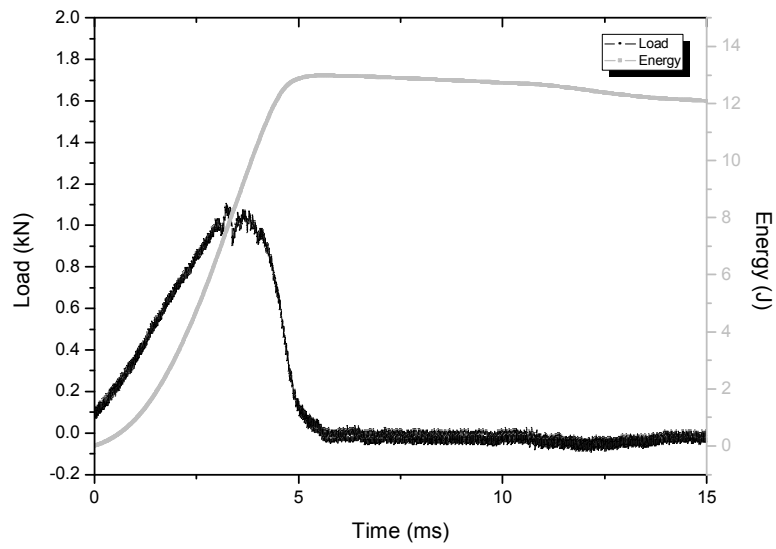
Figure 4.8 은 미처리 시편(a)과 에폭시를 처리한 시편(b)의 load 와 energy - time 커브를 나타내었고, 상세한 실험 결과는 Table 4.1 에 나타내었다. Figure 4.8 에서 확인 할 수 있듯이 (a)와 (b)를 비교하였을 때 maximum load 값은 비슷하지만 흡수 에너지 값은 3 배 가까이 차이 나는 것을 확인 할 수 있었다.

다음과 같이 차이가 나는 이유는 Figure 4.9 에서 확인 할 수 있다. 미처리 시편의 경우 섬유가 파단이 일어나지 못하고 그대로 tub 을 따라서 돌아옴이 일어남을 확인 할 수 있다. 또한 직물

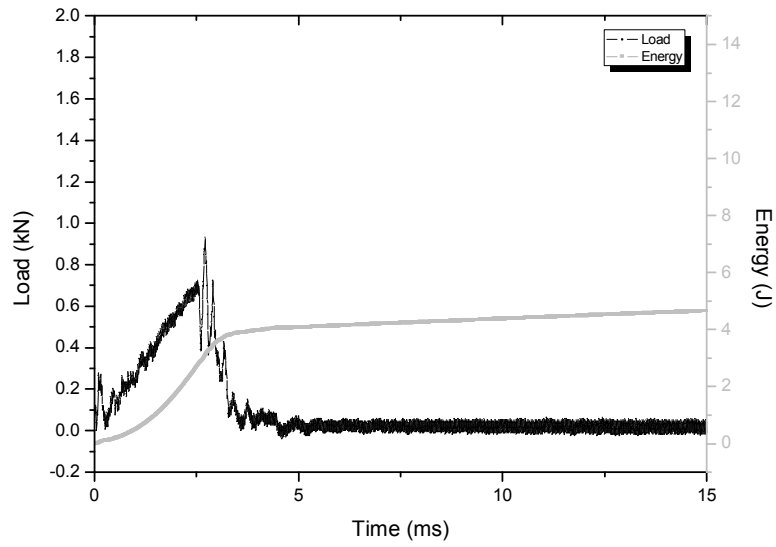
그립부분에서 직물이 미끄러지며 슬립이 일어난 부분도 확인 할 수 있다. 다음과 같이 파단이 되지 못하고 슬립이 일어나게 되면 그만큼 흡수 에너지로 계산이 되기 때문에 정확한 실험을 할 수가 없다.

본 실험에서는 직물의 슬립을 최소화 하기 위해서 기존의 100 mm × 100 mm 규격이 아닌 Figure 3.7 과 같이 십자 모양의 시편을 제작하여 네 변에 에폭시 수지를 처리하여 섬유의 파단이 일어나게 잡아주고 동시에 충격이 가해질 때 직물이 그립아래로 빨려 들어가지 않도록 설계하였다.

에폭시 수지를 처리한 결과 슬립이 일어나지 않고 파단이 일어남을 Figure 4.9 을 통하여 확인 할 수 있었다.



(a)



(b)

Figure 4.8 Load–energy versus time curves of  
(a) non treated aramid (b) aramid treated with epoxy



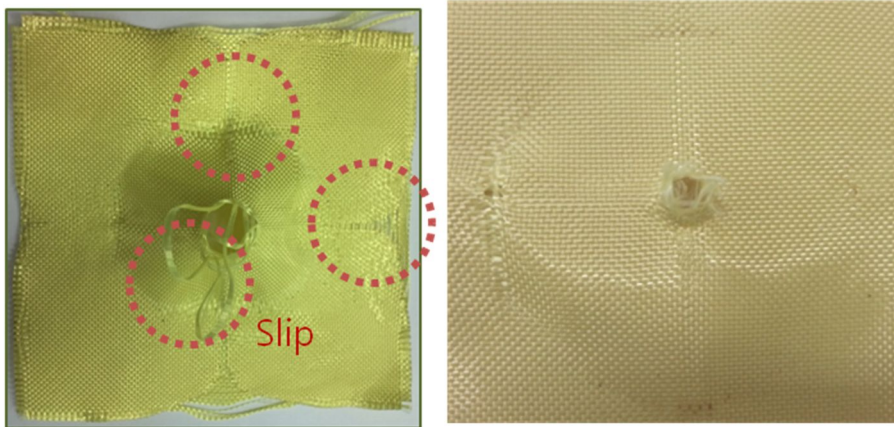


Figure 4.9 Low velocity impact test specimen of non treated aramid (left) aramid treated with epoxy (right)

Table 4.1 Results of low velocity impact test of different boundary condition

	Peak Load (kN)	Deflection at Peak Load (mm)	Energy to max load (J)	Total energy (J)	Impact velocity (m/s)
Non treated	1.1036	13.4409	7.5258	12.9645	3.2164
Treated with epoxy	0.9311	8.2195	3.1090	4.3392	3.0374

## 4.6.2 Effect of PU film thickness

PU-MRF/aramid 의 적층한 필름의 두께에 따른 영향을 알아보기 위하여 PU film 을 0.1 mm, 0.05 mm 로 제조하여 실험하였다. Figure 4.10 은 0.05 mm 필름을 사용한 PU-MRF/aramid (a) 시편과 0.1 mm 필름을 사용한 PU-MRF/aramid (b) 시편의 load 와 energy 커브를 나타내었다. Figure 4.10 (a)와 (b)를 비교하였을 때 (a) 가 maximum load 값과 흡수 에너지 값이 더 큰 것을 확인 할 수 있었고 (b)의 경우 neat aramid 와 큰 차이가 나지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 자세한 실험 결과는 Table 4.2 에서 확인 할 수 있다.

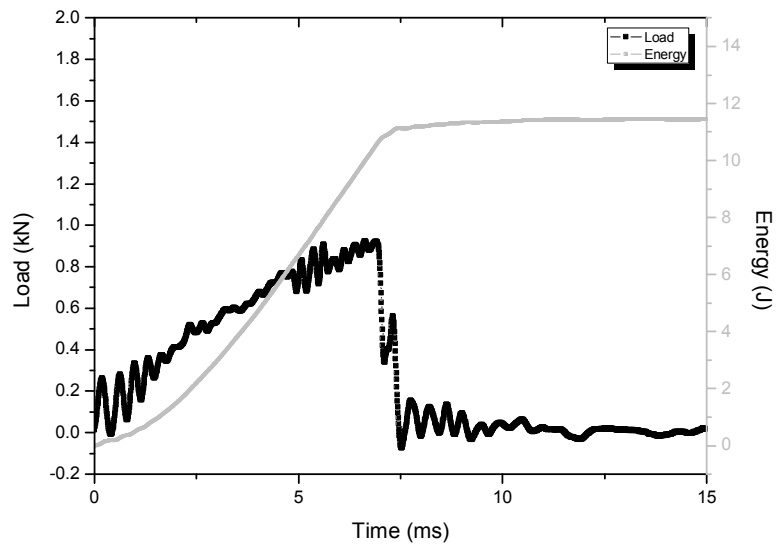
Figure 4.11 는 필름의 두께에 따른 흡수에너지를 나타낸 그래프이다. 동일한 면밀도일 때 0.05 mm 의 필름을 사용한 시편이 가장 흡수에너지가 높았고 neat aramid 와 0.1 mm 의 필름을 사용한 시편은 크게 차이가 나지 않았다. 그 이유는 Figure 4.12 을 통하여 확인 할 수 있다.

Figure 4.12 (a)의 경우 primary yarn 영역뿐만 아니라 secondary yarn 영역까지 변형이 일어나면서 에너지를 흡수했음을 알 수 있고 또한 전체적으로 직물과 필름 사이에 박리(delamination)가 일어나면서 에너지를 흡수하게 된다.

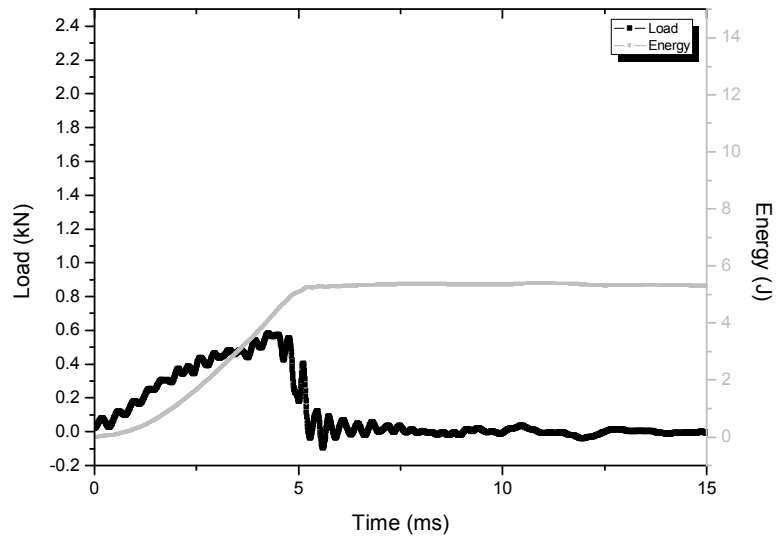
그러나 (b)와 같은 경우는 필름의 두께가 두꺼워짐에 따라서 stiffness 가 크게 증가하게 되어 충격 시 응력이 완화되지 못하고 충격이 일어나는 지점에 응력이 집중이 되면서 파단이 일어남을 확인 할 수 있었다. 또한 전체적으로 필름이 박리되지 못하고

primary yarn 영역만 박리가 일어나게 되어 에너지를 많이 흡수하지 못하였다.

위의 실험을 통해서 일정 이상 직물이 뺏뺏해지면 응력이 집중이 되어 더 적은 에너지로도 파단이 일어남을 확인 할 수 있었다. 따라서 본 실험에서는 0.05 mm 의 PU film 을 사용하여 시편을 제조하여 비교하였다.



(a)



(b)

Figure 4.10 Load–energy versus time curves of  
(a) film thickness 0.05 mm (b) film thickness 0.1 mm

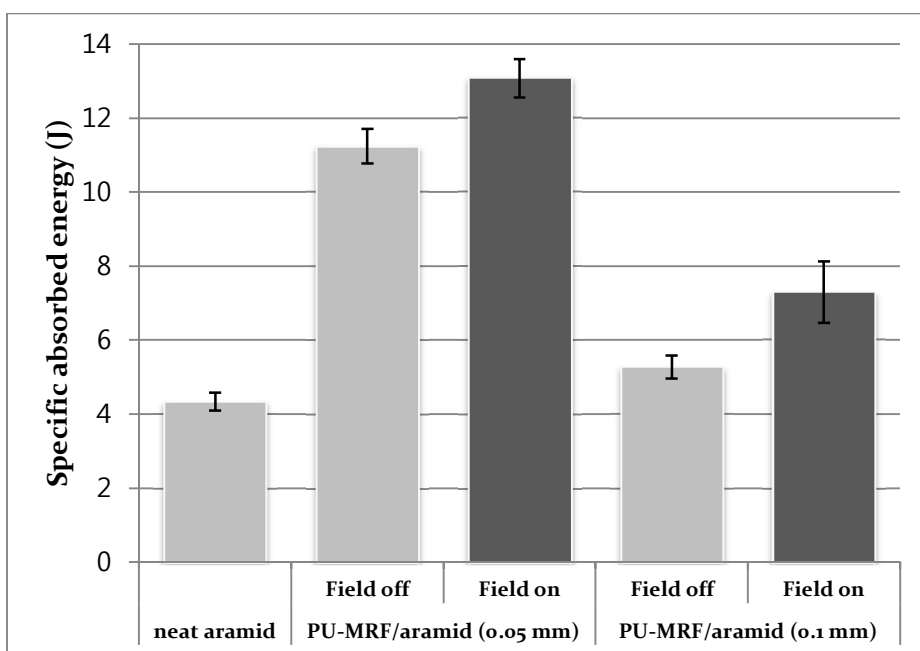


Figure 4.11 Specific absorbed energy of different film thickness

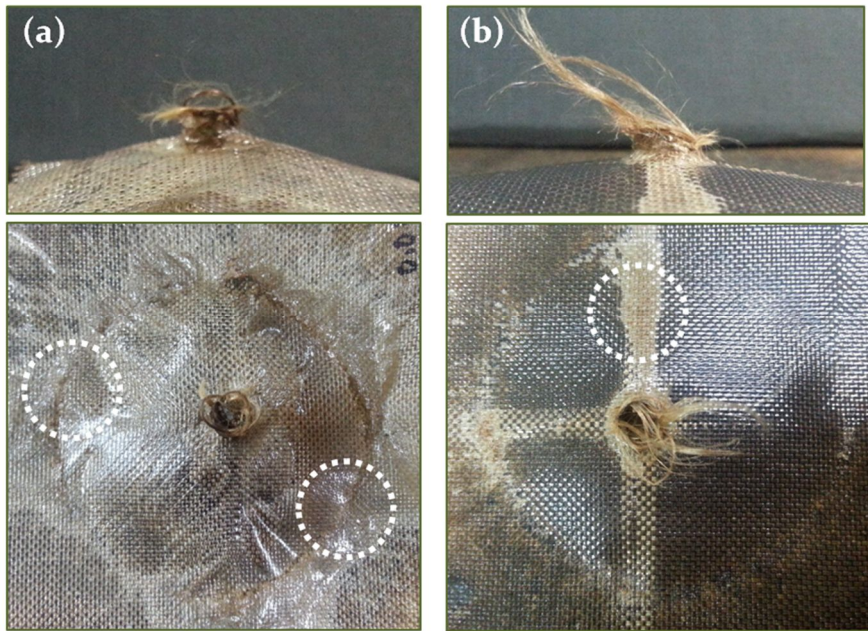


Figure 4.12 Low velocity impact test specimen of  
(a) film thickness 0.05 mm (b) film thickness 0.1 mm

Table 4.2 Results of low velocity impact test of different film thickness

	Peak Load (kN)	Deflection at Peak Load (mm)	Energy to max load (J)	Total energy (J)	Impact velocity (m/s)
0.05 mm film	0.9229	18.0010	9.9418	11.2351	3.194
0.1 mm film	0.9336	9.4353	4.673	5.2726	3.064

### 4.6.3 Effect of fabrication system and magnetic field

제조 시스템에 따른 충격 특성을 평가하기 위하여 neat aramid, PU/aramid, MRF/aramid, PU-MRF/aramid 네 가지 시편을 제조하여 실험하였다. 앞선 실험을 바탕으로 모든 시편의 가장자리에 에폭시를 코팅하였고 0.05 mm 두께의 PU film 을 시편제작을 위해 사용하였다. Figure 4.11 은 neat aramid 직물과 PU film 이 코팅된 아라미드 직물의 시간에 따른 load 와 energy 커브를 보여주고 있으며 Figure 4.12 와 4.13 은 MRF/aramid 직물과 PU-MRF/aramid 직물의 자기장의 미인가 및 인가시의 시간에 따른 load 와 energy 커브를 보여주고 있다. 자세한 실험 데이터는 Figure 4.14 및 Table 4.3 에 나타내었다.

자기장 미인가 시 충격 시험 결과 (Figure 4.11, 4.12(a) 및 4.13(a)) 동일한 면밀도 일 때 neat aramid 의 흡수에너지가 가장 낮았고 PU/aramid 와 MRF/aramid 가 흡수에너지 값이 비슷하였으며 MRF/aramid 시편이 가장 높은 에너지 흡수를 나타내었다.

다음과 같은 결과가 나타나는 이유는 neat aramid 의 경우 단순히 primary yarn 의 파단만이 에너지 흡수에 영향을 주기 때문에 가장 낮은 흡수 에너지 값을 보였다. 하지만 MRF 함침 및 PU film 의 코팅은 각각 직물 내에 존재하는 자성입자의 마찰력과 PU film 과 직물간의 delamination, debonding, matrix cracking 과 같은 거동이 혼합적으로 나타내며 파단을 일으키기 때문에 neat aramid 의 흡수 에너지와 비교하여 더 높은 에너지 흡수 거동을 나타나게 되었다. 또한 PU/aramid 직물보다 PU-MRF/aramid

직물이 더 높은 에너지 흡수를 나타나게 되는데 그 이유는 PU/aramid 직물의 경우 필름과 직물 사이에 존재하는 adhesion 으로 인한 interaction 이 너무 강하여 primary yarn 영역만 박리가 일어나기 때문이다. 그러나 PU-MRF/aramid 시편의 경우 필름과 직물 사이에 존재하는 MRF 가 interaction 을 감소시켜 secondary yarn 영역까지 박리될 수 있도록 함으로써 더 많은 에너지를 흡수하게 됨을 확인 할 수 있었다.

풀아웃 테스트와 저속충격시험을 통하여 확인 할 수 있듯이, 직물과 필름 사이의 interaction 이 너무 강하게 되면 오히려 응력이 집중 되어 적은 에너지로도 파단이 일어남을 알 수 있었다.

또한 자기장 인가 시 충격 시험 결과 (Figure 4.12(b) 및 4.13(b)) MRF/aramid 직물과 PU-MRF/aramid 직물 모두 자기장이 인가되지 않은 샘플과 비교했을 때 더 높은 에너지 흡수 능력을 갖게 됨을 확인 할 수 있었다.

그 이유는 시편 사이에 자기장을 걸어 주었을 때 자기장의 방향으로 자성입자들이 배향을 통해 MRF 및 복합재료 전체의 stiffness 의 증가를 유도하기 때문에 더 많은 에너지를 흡수 할 수 있게 된다.

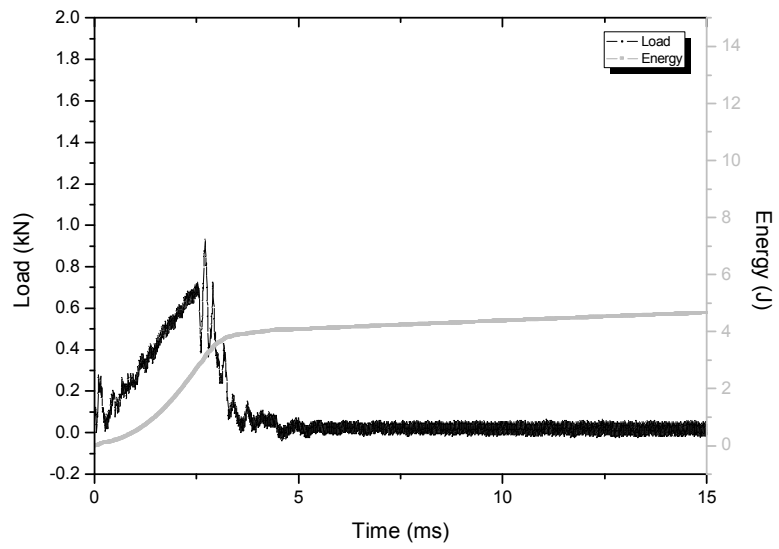
Figure 4.14 및 Table 4.3 에서 보여지듯이 neat aramid 직물과 MRF/aramid 직물보다 PU/aramid 직물과 PU-MRF/aramid 직물의 에너지 흡수 능력이 더 우수함을 확일 할 수 있었다. 이는 자기장의 미 인가 시 에너지 흡수 능력에 있어서 PU film 의 영향이 MRF 의 영향보다 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한 자기장이 인가 된 MRF/aramid 직물과 PU-MRF/aramid



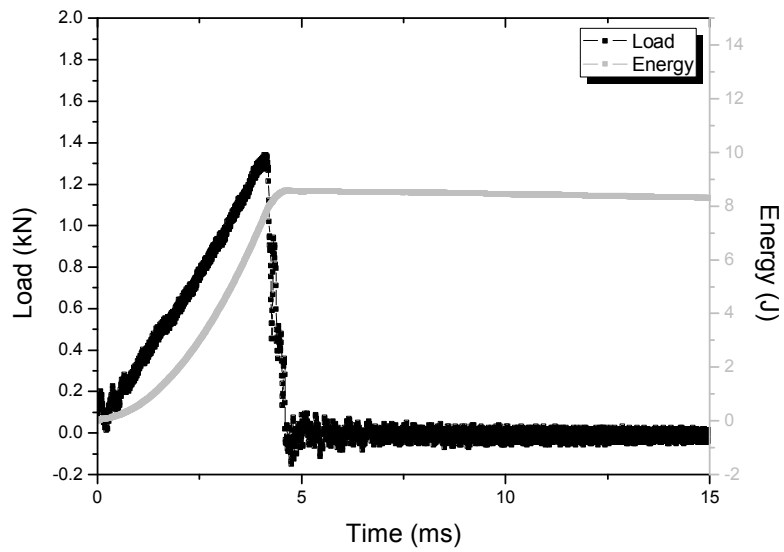
직물의 경우 자기장이 미인가 시 된 시편의 에너지 흡수 능력 보다 각각 33.7%와 16.4%가 향상 됨을 확인 할 수 있었다.

마지막으로 자기장이 인가 된 MRF/aramid 직물의 에너지 흡수 능력 보다 자기장이 인가 된 PU-MRF/aramid 직물의 에너지 흡수 능력이 27.5% 향상 됨을 확인 할 수 있었다. PU-MRF/aramid 직물은 oil 을 medium 으로 하는 자기유변 유체를 함침한 직물의 다양한 단점을 보완할 수 있을 뿐만 아니라 더 많은 에너지를 흡수 할 수 있는 장점을 갖게 된다.

따라서 이와 같은 시스템을 구현함으로써 인해 기존 neat aramid 직물과 MRF 가 함침된 aramid 직물의 performance 를 비교하였을 때 적절히 높은 폴아웃 포스를 가지면서 충격 시험을 통해 확인한 바와 같이 (figure 4.15) 파단 시 전체적으로 에너지를 흡수할 수 있는 PU-MRF/aramid 직물이 가장 좋은 방호 성능을 가지는 시스템임을 확인 할 수 있었다. 자기장이 인가된 PU-MRF/aramid 직물의 경우 동일한 면밀도의 neat aramid 보다 에너지 흡수 능력이 3 배 이상 뛰어남을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 판단해 볼 때 기존 neat aramid 직물을 사용한 방호재보다 더 적은 장수의 적층으로 같은 수준의 에너지를 흡수할 수 있을 것으로 기대된다.

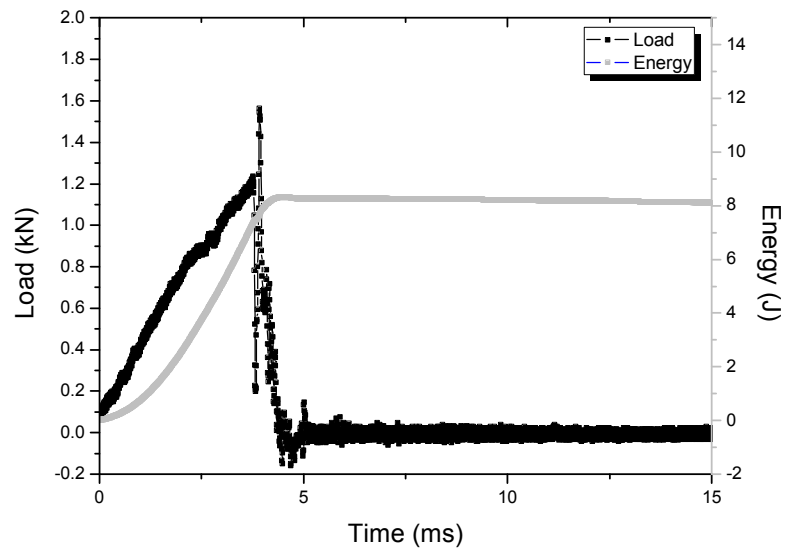


(a)

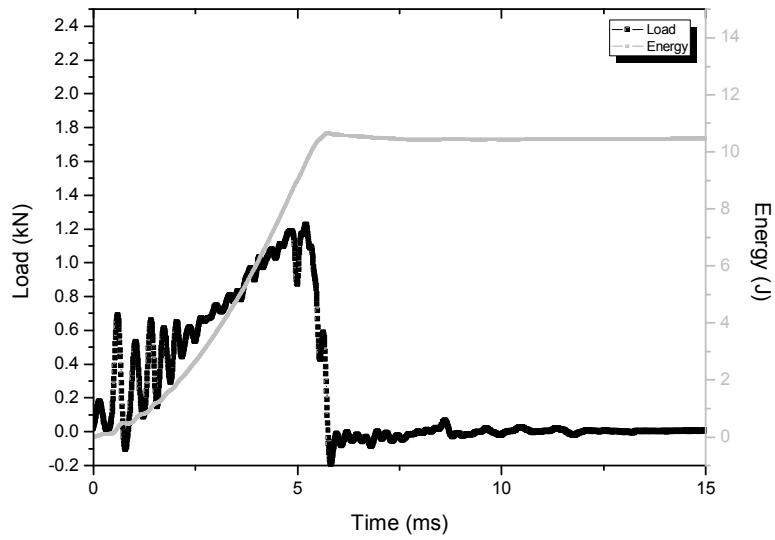


(b)

Figure 4.13 Load–energy versus time curves of  
(a) neat aramid (b) PU/aramid

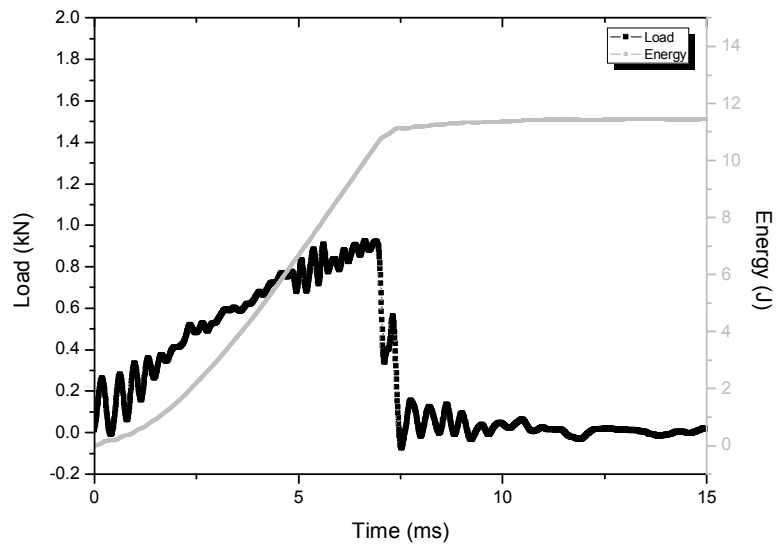


(a)

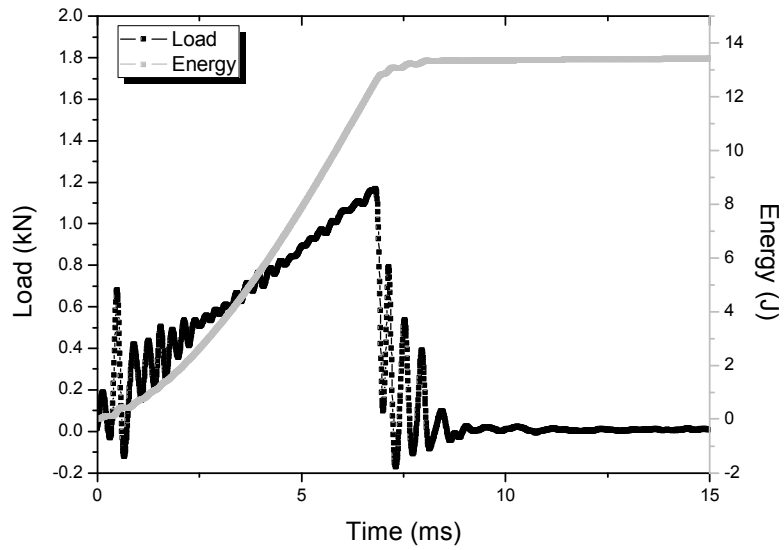


(b)

Figure 4.14 Load–energy versus time curves of MRF/aramid  
(a) Field off (b) Field on



(a)



(b)

Figure 4.15 Load–energy versus time curves of PU–MRF/aramid  
(a) Field off (b) Field on

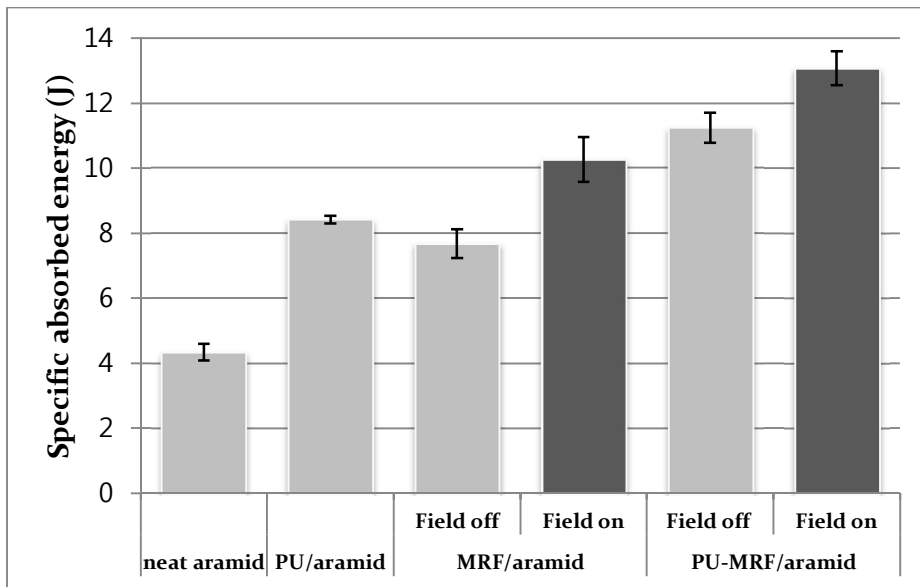


Figure 4.16 Specific absorbed energy of different fabrication system

Table 4.3 Results of low velocity impact test of different fabrication system

	Peak Load (kN)	Deflection at Peak Load (mm)	Energy to max load (J)	Total energy (J)	Impact velocity (m/s)
neat aramid	0.9311	8.2195	3.1090	4.3393	3.0374
PU/aramid	1.3408	12.0109	7.6145	8.4167	3.0287
MRF/aramid Field off	1.0114	13.5115	5.8582	7.6745	3.1973
MRF/aramid Field on	1.2272	15.6743	9.6005	10.2611	3.2054
PU-MRF/aramid Field off	0.9229	18.0010	9.9418	11.2351	3.194
PU-MRF/aramid Field on	1.1662	19.0659	11.5285	13.0793	3.1903

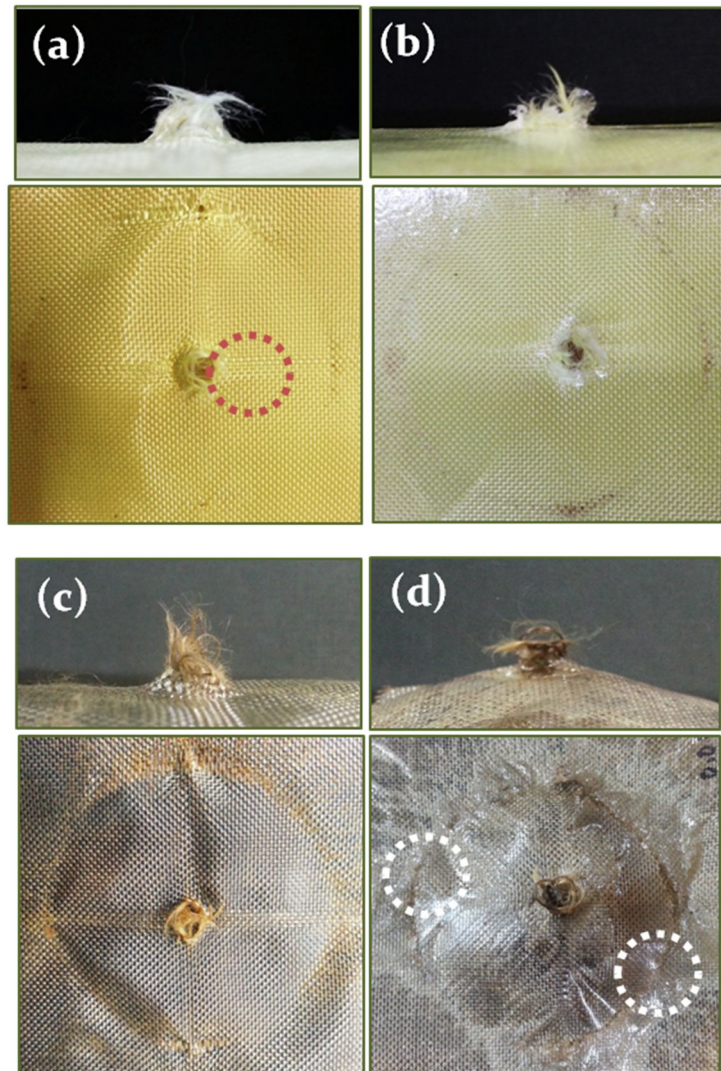


Figure 4.17 Low velocity impact test specimen of  
 (a) neat aramid (b) PU/aramid (c) MRF/aramid (d) PU-MRF/aramid

## 5. Conclusion

MRF 를 함침한 아라미드 직물에 라미네이팅 법으로 PU film 을 코팅 함으로서 비중이 높은 MRF 가 한쪽 방향으로 쏠리는 현상을 방지 하고 고인성의 PU film 의 특성을 응용하여 에너지 흡수 소재를 제조하고 이를 평가하기 위해 관통 저항성 및 저속 충격시험을 수행하였다.

자기장 인가에 따른 유변학적 특성을 관찰한 결과 MRF 가 자기장 하에서 순간적으로 shear stress 와 viscosity 증가함을 관찰 할 수 있었다. 또한 MRF 의 함침 및 PU film 의 코팅을 직물에 응용 함으로서 폴아웃 포스가 증가하는 것을 확인 할 수 있었고, flexural rigidity 실험을 통하여 자기장의 세기가 증가함에 따라 MRF/aramid 직물 과 PU-MRF/aramid 직물의 stiffness 가 증가함을 확인 할 수 있었다. MRF/aramid 된 PU-MRF/aramid

저속 충격 시험을 통하여 동일한 면밀도 하에서 neat aramid 직물과 MRF/aramid 직물보다 PU/aramid 직물과 PU-MRF/aramid 직물의 에너지 흡수 능력이 더 우수함을 확일 할 수 있었으며, 또한 MRF/aramid 직물과 PU-MRF/aramid 직물의 경우 자기장의 인가에 의해 에너지 흡수 능력이 각각 33.7%와 16.4%가 향상 됨을 확인 할 수 있었다. 또한 자기장이 인가 된 PU-MRF/aramid 직물의 경우 자기장이 인가 된 MRF/aramid 직물의 에너지 흡수 능력 보다 27.5% 향상 됨을 확인 할 수 있었다.

PU-MRF/aramid 시편의 경우 자기장을 인가 하였을 때 동일한 면밀도 하에서 neat aramid 보다 3 배 많은 에너지를 흡수

함을 확인 할 수 있었다. 따라서 다음과 같은 시스템을 통하여 기존 neat aramid 만 사용한 방호재보다 더 적은 장수의 적층으로 같은 수준의 에너지를 흡수할 수 있을 것으로 기대된다.



## 6. References

1. Park, J.L., et al., *Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part I Effect of laminating sequence*. Textile Research Journal, 2012.
2. Ashour, O., C.A. Rogers, and W. Kordonsky, *Magnetorheological fluids: materials, characterization, and devices*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1996.
3. Laun, H., C. Gabriel, and C. Kieburg, *Magnetorheological fluid in oscillatory shear and parameterization with regard to MR device properties*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010.
4. Cheeseman, B.A. and T.A. Bogetti, *Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates*. Composite Structures, 2003.
5. Carlson, J. and J. Sproston. *Controllable fluids in 2000 Status of ER and MR fluid technology*. in *Actuator 2000 7th International Conference on New Actuators*. 2000.
6. Larson, R.G., *The structure and rheology of complex fluids*. Vol. 1. 1999: Oxford university press.
7. Wang, H., et al., *The Mechanical Property of Magnetorheological Fluid Under Compression, Elongation,*

- and Shearing*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011.
8. Ginder, J., *Rheology controlled by magnetic fields*. Encyclopedia of Applied Physics, 1996.
  9. Rabinow, J., *The magnetic fluid clutch*. American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the, 1948.
  10. Hepburn, C., *Polyurethane elastomers*. C. Hepburn, Applied Science Publishers, Barking(Essex) 1982, 402, 1982.
  11. Oertel, G. and L. Abele, *Polyurethane handbook: chemistry, raw materials, processing, application, properties*. 1985: Hanser Publishers. Distributed in USA by Scientific and Technical Books, Macmillan.
  12. Watt, W. and B. Perov, *Strong fibers*. Handbook of Composites, 1985.
  13. Kang, T.J., et al., *Rheological behavior of magnetic carbon nanotubes and their application as kevlar coating*. Fibers and Polymers, 2011.

## ENGLISH ABSTRACT

PU-MRF/aramid fabric composites were fabricated and their impact resistance was studied. The contribution of the PU-MRF matrix to the system impact resistance is discussed. The mechanisms of impact energy absorption of composite laminates and neat aramid fabrics are discussed and analyzed by optical microscopy.

Magneto-rheological (MR) fluids consist of stable suspensions of magnetic particles in a carrying fluid. When an external magnetic field is applied, MR fluids exhibit drastic and reversible changes in rheological properties due to the field-induced ordering of the particulate phase.

Through pull-out test, puncture resistance test and flexural rigidity test, we can see that influence of magnetorheological fluid. When applied magnetic field, mechanical properties of PU-MRF/aramid composites were improved. Because the magnetic particles are aligned along the direction of the magnetic field, that phenomenon influences particle friction in fabric.

It was found that adding a PU-MRF matrix increases the impact performance of PU-MRF/aramid fabric when compared to the neat aramid fabric with similar areal density.

It was also found that the enhanced impact performance of PU–MRF/aramid fabric is due to the fact that the PU film and MRF enables different energy absorbing mechanisms, including particle friction, fabric/matrix debonding, matrix cracking and delamination, which are not observed in neat p–aramid fabric systems.

The findings in this study are important from a design viewpoint of soft armors because less aramid fabric is required to obtain the same level of protection.